Über
Flüssigkeitsmembranen.

Inaugural-Dissertation

einer

hohen philosophischen Fakultät der Universität Rostock

zur

Erlangung der Doktorwürde

vorgelegt von

Adolf Müller,

Eltville.

ROSTOCK.

Carl Boldt'sche Hof-Buchdruckerei.

1904.

Referent: Herr Prof. Dr. **Wachsmuth.**

Inhalt.

Seite

I. Einleitung 5
II. Versuchsanordnung 9
III. Beobachtungsverfahren 12
IV. Ergebnisse 14
V. Diskussion 27
VI. Zusammenfassung 31
Litteratur 33

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41549207_0131

I.

Die Untersuchung der Klangfiguren gespannter Membranen ist im vergangenen Jahrhundert Gegenstand zahlreicher theoretischer Abhandlungen gewesen. Selbst wenn man nur die wichtigsten derselben herausgreift, so ist es überraschend, welche Fülle von Arbeit gerade diesem Problem gewidmet worden ist.[1–12])

Anders ist es mit den diesbezüglichen praktischen Untersuchungen. Dieselben stehen weit hinter der Theorie zurück und es schien eine dankbare Aufgabe, einen weiteren Beitrag zu dem experimentellen Teil dieses Kapitels liefern zu können.

Während des Verlaufs meiner Arbeiten wurde das interessante Werkchen von Herrn Karl Antolik[16]) veröffentlicht, so daß meine weiteren Untersuchungen in dieser Richtung überflüssig wurden. — Immerhin ist es vielleicht ganz interessant, einige Resultate des Herrn Antolik durch eigene Erfahrung sowohl wie durch die beigegebenen Lichtbilder bekräftigen und ergänzen zu können. So liest man beispielsweise überall, wo von schwingenden Membranen die Rede ist, daß sich bei deren Erregung Durchmesser und konzentrische Kreise, bezw. bei eckigen Membranen parallele Geraden zu den Seiten bilden. Das ist nicht

richtig. Wenn auch bei Betrachtung mit bloßem Auge die Knotenlinien einfache Kreise und Durchmesser zu sein scheinen, so stellt es sich doch bei genauerer Untersuchung (wie sie durch die auf Seite 9 beschriebene Anordnung gespannter Seifenlamellen möglich ist) heraus, daß man es in Wirklichkeit mit einer Anzahl radial bezw. ringförmig verlaufenden Knotenlinienelementen zu tun hat, die sich niemals schneiden. Figur 1 läßt dies in klarer Weise erkennen. Herr

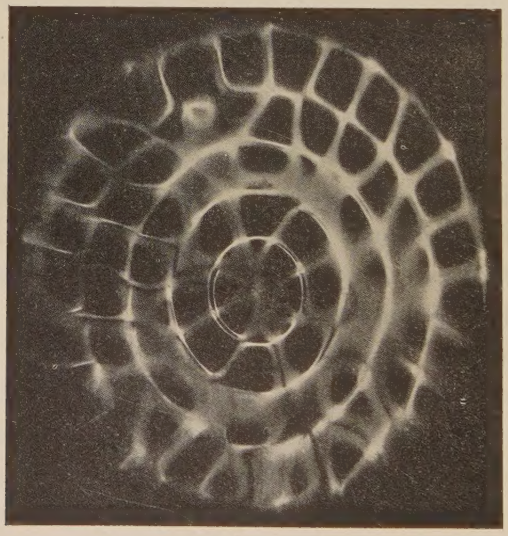
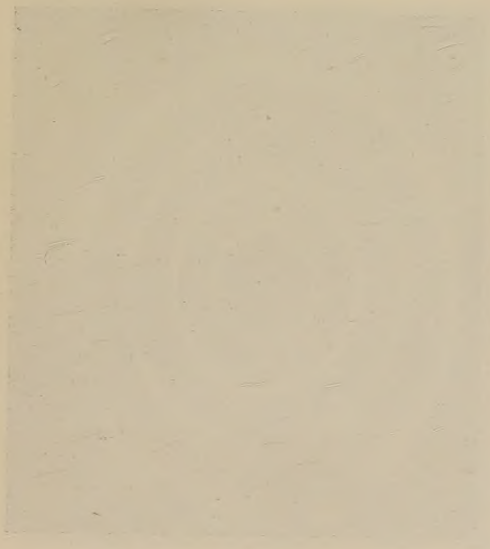
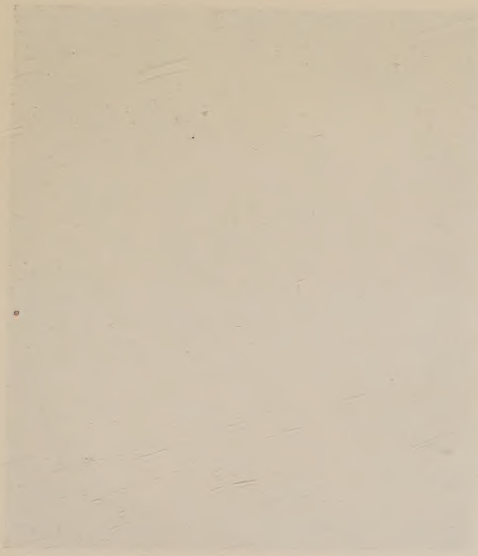


Fig. 1.

Antolik berichtet über diesen Fall: „Einander schneidende Knotenlinien können sich unmöglich bilden; sehen wir jedoch eine derartige Erscheinung, so ist diese nur scheinbar. . . . . Auf runden Membranen lagern sich die Interferenzlinien teils in konzentrischen





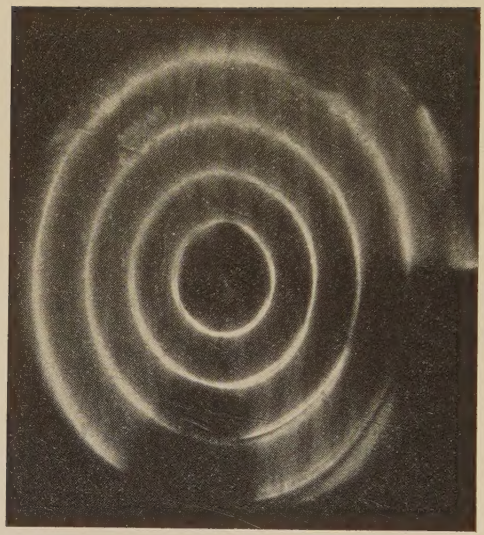


Fig. 3.

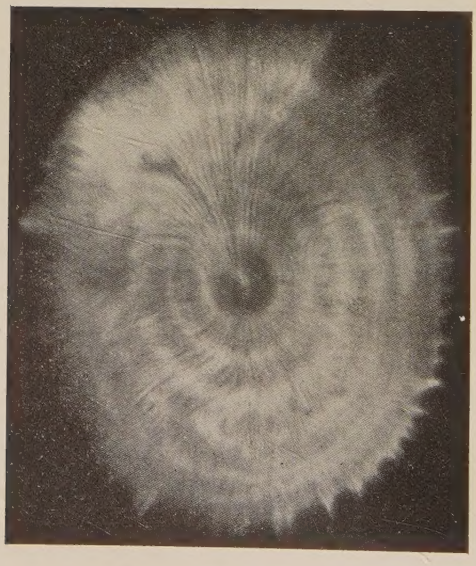


Fig. 5.

Kreisen, teils in der Richtung der Radien speichenförmig, kurz: In zwei aufeinander stehenden senkrechten Richtungen, — ohne sich zu schneiden —."

Figuren 2—5 zeigen eine Reihe von erzwungenen Schwingungen einer Membran, wie sie durch die Stimmgabeln $c^1 c^2 g^2 c^3$ erregt wurden. Die von Herrn Antolik (Figur 12) gezeichnete Grundschwingung mit nur einem Knotenkreis am Rande zu erzielen, gelang nicht. Die Abmessungen der obenstehenden Figuren gibt für die Verhältnisse der Wellenlängen 14 : 7,25 : 5,6 : 4,5, d. h.

Figur 2 als Oktave des Grundtones zeigt 2 Ringe,
„ 3 „ II. „ „ „ „ 4 „
„ 4 „ Quinte der II. Oktave „ 5 „
„ 5 „ III. Oktave des Grundtones „ 6 „

Die Zahlenverhältnisse genauer festzustellen schien in Anbetracht der perspektivischen Verschiebung bei der photographischen Aufnahme ohne Wert.

Eine weitere merkwürdige Erscheinung besteht im Auftreten eines Ringes dicht am Rande der Membran, dessen Charakteristik durch Herrn Prof. Wachsmuth vor Veröffentlichung der Antolik'schen Arbeit erkannt wurde. Dieser Ring besitzt die Eigenschaft, daß er sich weder durch Vergrößern noch durch Verkleinern der Membran beseitigen läßt, sondern bei jedem beliebigen Tone in der Nähe des Randes zum Vorschein kommt. (Figuren 2, 3, 4, 5.) Sein Abstand von diesem ist dabei immer kleiner als $^1/_2$ Wellenlänge der Membran. Herr Antolik, der diesen Kreis an Klangplatten feststellte, führt die Entstehung desselben gewiß

mit Recht auf die Accomodation der Randschwingung zurück. Es sei hier noch erwähnt, daß von mir die sämtlichen Experimente an Flüssigkeitsmembranen ausgeführt wurden. Dieselben eignen sich infolge ihrer gleichmäßigen Beschaffenheit und Spannung, sowie ihrer außerordentlichen Empfindlichkeit sehr gut zur Wiedergabe von Partialschwingungen. Ferner ist ihre Erregung durch einen Resonator (S. 10) zuverlässiger und bequemer als die zum Teil ziemlich komplizierten und daher viel Geschick erfordernden Methoden, die bei starren Membranen zur Anwendung kommen. Einen Fehler haben diese Flüssigkeitshäute allerdings und zwar den, daß ihre genaue Beobachtung direkt durch das Auge mißlingt. Um so reichlicher aber wird man entschädigt, wenn man die Bewegung jener feinsten Gebilde durch eine passende Anordnung (S. 10) sichtbar macht. — Die Aufnahmen der Figuren 1—5 unterscheiden sich dadurch, daß Fig. 1 durch die kleinste Blende aufgenommen wurde, während zur Aufnahme von 2, 3, 4 und 5 größere Blenden zur Anwendung kamen. So erklärt es sich, daß Figur 1 alle Einzelheiten getreu wiedergibt, während auf den übrigen Abbildungen nur die Knotenkreise in ihren Hauptzügen zu erkennen sind.

Meine weiteren Untersuchungen erstrecken sich nun auf eine bei schwingenden Lamellen auftretende Erscheinung, welche Mr. Sedley Taylor in den Proceedings der Royal Society (London) [14]) beschreibt. Herr Taylor bemerkte auf solchen Lamellen, wenn die Interferenzfarben sichtbar wurden, Figuren von

allen möglichen Formen, welche sich, je nach der Tonstärke mit größerer oder geringerer Geschwindigkeit um sich selbst drehten. Ich habe die Versuche zum Teil wiederholt und werde weiter unten die Taylor'sche Beschreibung der Farbenbilder wiedergeben.

II.

Die Versuchsanordnung wurde teils von Herrn Taylor übernommen, teils durch einige Änderungen vervollständigt.

Da die Beobachtung einer Seifenhaut nur bei auffallendem Licht ausgeführt werden kann, wurden die Lichtstrahlen eines Projektionsapparates P (siehe umstehend Fig. 6) von dem Spiegel s durch die feinkörnige Mattscheibe x auf die Membran m reflektiert und diese dann von b aus beobachtet.

Die Mattscheibe x wurde deshalb in den Strahlengang geschaltet, weil sie die Sichtbarkeit der Interferenzfarben erhöhte. Trat an Stelle des Auges eine photographische Kamera, dann wurde die Mattscheibe entfernt und bei y eine Sammellinse in den Strahlengang geschaltet.

Die folgenden Versuche erstreckten sich hauptsächlich auf kreisförmige Membranen, deren Durchmesser $4^1/_2$ cm betrug. Es wurde auch mit größeren Membranen — bis zu 20 cm Durchmesser — experimentiert, aber dadurch keine günstigeren Verhältnisse geschaffen; im

Gegenteil erwiesen sich Membranen von kleinerem Durchmesser empfindlicher. —

Da nun eine Flüssigkeitsmembran infolge der geringen Dicke einen sehr tiefen nicht wahrnehmbaren

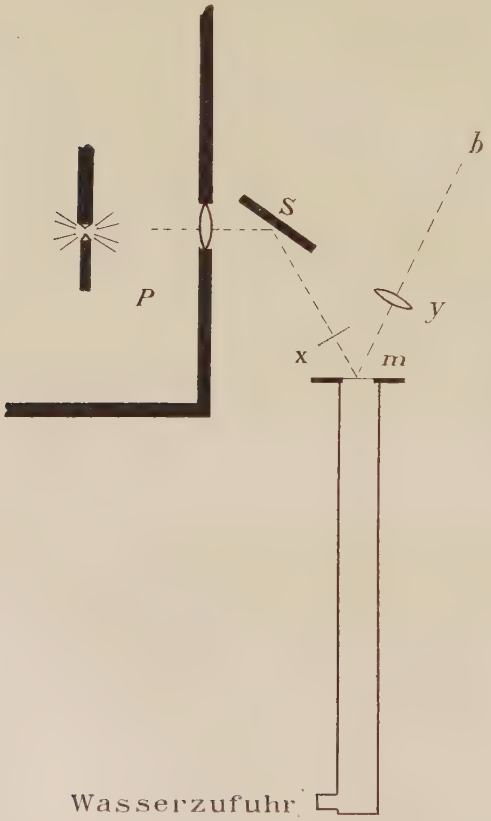


Fig. 6.

Eigenton besitzt, so können an ihr nur erzwungene Schwingungen beobachtet werden. Zur Erregung der Membran wurde die, auch von Herrn Taylor als

zweckmäßig befundene Resonanzmethode zur Anwendung gebracht, d. h. die über die Mündung eines Resonators gespannte Membran wurde durch dessen Grundton zum Mitschwingen veranlaßt. Die Verbindung Membran-Resonator wurde hergestellt durch eine, auf die Mündung des Resonators gelegte dünne Blechscheibe, in deren Mitte sich zur Aufnahme der Membran eine kreisrunde Öffnung befand. Der Hauptvorteil bei dieser Anordnung bestand darin, daß die Haut genau eben blieb, während sie, direkt über die Resonatoröffnung gezogen, bestrebt war, an den Innenwänden herabzugleiten, bis die eingeschlossene Luft der Weiterbewegung einen gewissen Widerstand entgegensetzte. Dieser bewirkte aber ein Aufwölben und oft eine einseitige Neigung der Membran, so daß dieselbe infolge ihrer sphärischen Oberfläche nicht brauchbar wurde. Die Seifenlösung zur Herstellung der Lamelle wurde nach untenstehenden Angaben zusammengesetzt.*)

Als Resonator wurde eine zylindrische Röhre von $5^1/_2$ cm Durchmesser und 62 cm Höhe entsprechend $^1/_4$ Wellenlänge des tiefsten angewandten Tones benutzt,

*) Eine reine Flasche wird $^3/_4$ mit destilliertem Wasser gefüllt, $^1/_{40}$ des Wassergewichts ölsaures Natron zugesetzt und einen Tag lang stehen gelassen. Alsdann füllt man die Flasche mit Glycerin an, schüttelt kräftig und verwahrt sie eine Woche im Dunkeln. Die Lösung darf weder erwärmt noch filtriert werden! Die klare Flüssigkeit wird vermittels Heber abgezogen und in gut verkorkter Flasche dunkel aufbewahrt. Durch Hinzufügen einiger Tropfen Ammoniak wird die Brillanz der Interferenzfarben erhöht. (Vgl. Boys, Seifenblasen, deutsch von Meyer, Leipzig 1893, pag. 63.)

deren Abstimmung durch von unten zugeführtes Wasser beliebig variiert werden konnte. Als Tonquelle dienten auf Resonanzkästen aufgeschraubte Stimmgabeln von verschiedener Tonhöhe, welche durch Anstreichen mit einem Violinbogen erregt wurden.

Dieselben verdienen wegen ihres reinen, von Obertönen freien Klanges den Vorzug gegenüber andern tonerzeugenden Instrumenten. In den mittleren Tonlagen bewährten sich auch Orgelpfeifen recht gut, deren Modulationsfähigkeit indessen viel zu wünschen übrig ließ. Ebenso mußte aus dem letzten Grunde von einer Verwendung elektrisch betriebener Stimmgabeln abgesehen werden. Durch den Stromunterbrechungsmechanismus bei diesen wurden außerdem Nebengeräusche hervorgebracht, welche den klaren Ton der Gabel nachteilig beeinflußten.

III.

Das Beobachtungsverfahren gestaltete sich folgendermaßen. Zunächst wurde der Metallrahmen mit der Seifenhaut überspannt und auf die Öffnung des Resonators gelegt. Sobald die Interferenzfarben zum Vorschein kamen, wurde eine Stimmgabel, die mit dem Ton des Resonators übereinstimmte, wie angegeben, durch den Violinbogen zum Ertönen gebracht und mit der offenen Seite des Resonanzkastens in die Nähe der Membran gehalten. Es entstand nun auf

dieser ein wirres Durcheinander von in sich geschlossenen Farbenbändern und Kreisen, die in schneller Bewegung um sich selbst begriffen waren. Da Taylor bereits diese Erscheinung beschrieben hat, so will ich dieselbe mit seinen Worten wiedergeben. Er sagt: „With a tenatious film and uniform bowing, this resulted in the formation of a fixed figure, consisting of coloured bands, straight or curved, symmetrically arranged, and generally accompanied by one or more colour-vortices rotating in opposite directions. A single sweep of the bow usually sufficed to call out such a figure from a previous state of colour-chaos, and, when it was once established, careful bowing would keep it fairly steady for some little time. While, however, its form remained thus constant, its colours underwent a progressive series of changes as the thickness of the film gradually diminished. Presently there would come a complete break-up of the figure, often accompanied by a violent rotation of the whole film, after which a different figure, generally of a simpler form, would establish itself, to be in its turn, provided the film only held out long enough, replaced by another and still more simple figure. Sometimes, but much less frequently, the changes of form occurred without a separating interval of disorder, the incoming figure supplanting its predecessor with kaleidoscopic abruptness. The most interesting feature of these figures was their stationary colour-vortices, arranged pairwise, and churning round and round with a velocity which seemed limited only by the loudness of the sound at command,

and by the capacity of the film for bearing the strain put upon it. The fixed bands, viewed at any one instant, mostly presented a surprising degree of complexity, with entire symmetry in the arrangement both of form and of vividly contrasting colour. The general effect may, perhaps, be compared to that of an elaborate „set-piece“ of fireworks, in which turbines of coloured flame play a conspicuous part. But the great charm of the experiment lay in watching the successive changes of form and hue which, beautiful from the very outset, became, as the film neared its moment of dissolution, surpassingly gorgeous . . . . . In all the preceding figures the axis of symmetry was evidently determined by the direction in which the sonorous vibrations reached the film.“

IV.

Wie des weiteren aus jener Arbeit hervorgeht, konnte Taylor ein regelmäßiges Auftreten der Figuren nicht wahrnehmen, vielmehr brachte jede neue Haut andere Figuren mit sich, ja es war kaum möglich, auf ein und derselben Membran ein und dasselbe Bild mehrmals hintereinander zu erzeugen. Zuerst ging es mir ebenso. Wenn nach kurzer Unterbrechung des Tones, durch vorsichtiges Blasen, die Membranteilchen umgelagert wurden, so war es ausgeschlossen, das frühere Bild auf der Membran wieder zu erlangen.

Diese Erscheinung weist darauf hin, daß an dem häufigen Wechsel wahrscheinlich die Beschaffenheit der Lamelle schuld sein muß.

Außerdem erschienen die Interferenzfarben in den Zentren jener kleinen Ringe, ebenso wie in den von den Bändern eingeschlossenen Teilen, weniger deutlich wie ihre rotierenden Begrenzungen oder garnicht, und man konnte hieraus folgern, daß die Haut nicht an allen Stellen gleiche Dichte bezw. Elastizität aufweise, so daß diese dichteren Teile wegen ihrer schwereren Beweglichkeit im Ruhezustand blieben.

Um nun diesen Zustand zu beseitigen, versuchte ich die Membran durch heftigste Erregung durcheinander zu rütteln und sie auf solche Weise homogen zu machen. Damit eine möglichst gründliche Vermischung der Seifenmassen erreicht wird, muß die Membran allerdings bei einer solchen Erregung bis zu den Grenzen ihrer Haltbarkeit beansprucht werden. Das Experiment gelang ohne Schwierigkeit, und es blieben jedesmal zwei etwa halbkreisförmige Figuren übrig, die sich im entgegengesetzten Sinne um sich drehten. (Siehe umstehend Fig. 7.)

Die Bewegung der gemeinsamen Mittellinie schien dabei, wie bereits Taylor erwähnt, immer durch die Richtung der Schallwellen bestimmt, und man konnte diese Linie durch entsprechende Handhabung der Stimmgabel um jeden beliebigen Winkel drehen. Eine Bahn für die Bewegung war durch das stehende Wellensystem nicht bezeichnet, im Gegenteil rotierten die Figuren ohne jede Berücksichtigung desselben

darüber hinweg. — Es wäre nun anzunehmen, daß die Rotationsgebilde von ihren Rändern gegen die Mitte hin infolge der Zentrifugalkraft dünner werden und Farbenerscheinungen analog den Newtonschen Ringen zur Folge haben müßten. Derartige Erscheinungen traten nicht auf, sondern die Farbenzusammenstellungen

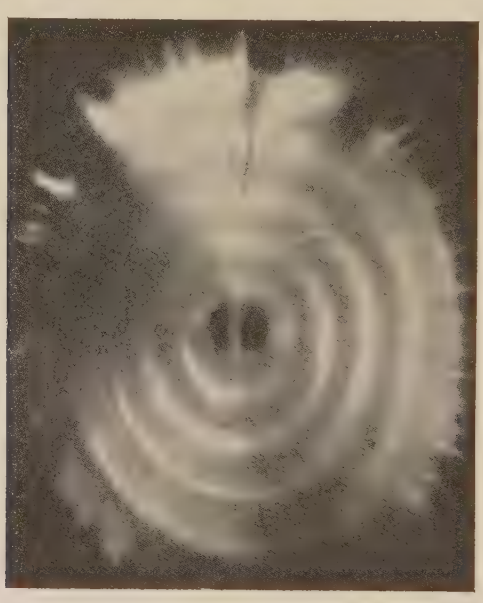


Fig. 7.

zeigten sich in ihrer Reihenfolge ganz willkürlich und kommen auf folgende Weise zu stande: Die auf einer in Ruhelage befindlichen Lamelle verteilten Farbenkomplexe, werden bei ihrer Erregung von der gemeinsamen Mittellinie geteilt und durch die Rotation in Bänder ausgezogen. Die Gruppierung folgt dann in

dem Verhältnis, wie die Komplexe vor der Erregung näher oder weiter von den Zentren der beiden Figuren gelegen waren.

Hatte man die beiden halbkreisförmigen Gebilde in der angegebenen Weise hervorgerufen, so genügte ein schwaches Streichen der Gabel, um dieselben weiter bestehen zu lassen. Auch nach kurzer Unterbrechung war nur ein verhältnismäßig schwacher Ton erforderlich, um dieselben Figuren sofort wieder zu erzeugen. Ließ man indessen einige Zeit vergehen und strich dann die Gabel, so fanden sich gewöhnlich dieselben störenden Verhältnisse wie früher wieder vor, und es bildeten sich abermals die merkwürdigsten Kombinationen. Dieser Wechsel innerhalb weniger Minuten hat seine Ursache in der ungleichmäßigen Verdunstung der Seifenlamelle. Das in der Seifenlösung enthaltene Glyzerin kann mit der Verdunstung des Wassers nicht Schritt halten, und so bleiben die kleinen Glyzerintröpfchen als Unebenheiten in der Membran zurück. Indessen war es nicht schwer, auf die erwähnte Art die Ordnung wieder herzustellen.

Eine einfachere Zusammenstellung als zwei Figuren auf einem Film hervorzurufen ist mir nicht gelungen. Ebenso war eine Beziehung im Auftreten der Figuren nach Form und Zahl mit der Größe der Membran nicht nachzuweisen, denn auf sämtlichen Membranen, mit denen ich arbeitete — es waren solche mit Durchmesser von 1,5 bis 20 cm — zeigten sich überall dieselben Erscheinungen. Das Einzige, was mir bei diesen Vergleichen auffiel, war, daß kleine Membrane

sich empfindlicher zeigten als die größeren und zu ihrer Erregung infolgedessen eines schwächeren Tones bedurften, weshalb sie sich, besonders zum Experimentieren mit hohen Tönen eignen.

Sehr merkwürdig ist es auch, daß die Tonhöhe auf die Form der Figuren, sofern man den Membranresonator auf den betreffenden Ton abstimmt, ohne jeden Einfluß bleibt. So war es z. B. möglich, mit allen Tönen zweier Oktaven, von 129—516 Schwingungen in der Sekunde immer ein und dasselbe Bild auf der Seifenhaut hervorzubringen. Sogar ein Ton von 4000 Schwingungen, der durch eine Galtonpfeife erzeugt wurde, ließ die Erscheinung sofort deutlich auftreten. Diese Tatsache überrascht um so mehr, als sie im direkten Widerspruch zu Taylors Mitteilungen über seine diesbezüglichen Untersuchungen steht. Taylor äußert sich hierüber folgendermaßen: „When larger apertures, or a fork and box of higher pitch, were used, the resulting figures became rapidly more complex, and forms were readily obtained in which the whole film was covered with an uniform pattern consisting of some single figure analogous to one of those already described repeated over and over again. With very acute sounds the separate figures became too small for recognition and too numerous for counting.“

Wie hieraus hervorgeht, hat Taylor gerade die entgegengesetzten Wahrnehmungen gemacht. Es ist dies darauf zurückzuführen, daß Taylor die Bedingungen für das Zustandekommen jenes einfachen Typs nicht kannte, und es ist nicht schwer einzusehen, daß dann

auf einer größeren Fläche selbstredend auch mehr Figuren entstanden. Davon aber abgesehen, war, wie Taylor angibt, ein regelmäßiges Auftreten der Figuren nicht zu erzwingen. Wenn nun bei ihm ein und derselbe Ton unter gleichen Verhältnissen jedesmal ein anderes Bild zur Folge hat, so ist man wohl berechtigt, die Ursache dieser Erscheinungen in der ungleichen Beschaffenheit der Seifenhaut zu suchen, wie ich durch meine Ergebnisse bestätigen zu können glaube.

Was den letzten Satz Taylors anbetrifft: daß die Figuren bei schrillen Tönen zu zahlreich und zu klein sind, um erkannt zu werden, so darf man wohl annehmen, daß auch bei diesen Tönen, wenn man sie mit genügender Stärke anwendet, dieselben Figuren entstehen, wie bei solchen der angegebenen Tonlagen. Man kann sich davon durch den Versuch leicht überzeugen. Hohe Stimmgabeln müssen allerdings bedeutend stärker angestrichen werden, um Bewegung in die Lamelle zu bringen als tiefere Gabeln, und zwar wurde mit solchen von 516 Schwingungen die obere Grenze erreicht. Die Kraft des Tones reichte dann gerade noch aus, um die Rotation hervorzurufen. Wenn die Stimmgabel versagte, arbeitete eine passende Pfeife noch ganz regelmäßig, aber noch vor der nächst höheren Oktave blieb auch hier die Wirkung aus. Eine Galtonpfeife, welche mit komprimierter Luft betrieben wurde und die 4000 Schwingungen erzeugte, brachte die Bewegung, wie bereits erwähnt, ohne Schwierigkeit zu stande. Der Ton mußte allerdings zu ganz außerordentlicher Stärke gesteigert werden:

dann wurde er aber so unangenehm für das Ohr, daß nach ganz kurzer Einwirkung eine zeitliche Störung des betreffenden Gehörnerven eintrat.*) — Da Herr Taylor nur mit Tonstärken arbeitete, wie man sie mit den sonst üblichen Instrumenten hervorbringen kann, so ist es zweifelhaft, ob mit sehr hohen Tönen diese Art Figuren überhaupt erzeugt werden konnte, und es ist leicht möglich, daß eine Verwechselung mit den kleinen, von Knotenlinien eingeschlossenen Feldern vorliegt.

Ich kann somit Herrn Taylors Angaben über diesen Fall wohl dahin ergänzen, daß die Form und Zahl der rotierenden Figuren auf Flüssigkeitslamellen weder an die Größe der Lamellen noch an die Höhe des Tones gebunden ist, daß aber in den Tonwellen eine bestimmte Energie vorhanden sein muß, um dieselbe hervorrufen zu können. Man hat also in der Rotation der Seifenhaut ein Mittel zur Vergleichung der ihr in der Zeiteinheit zugeführten Energiemengen und der zugehörenden, mit dem Ohr geschätzten Tonstärken. Es bestätigt sich eine von Herrn Max Wien[17])

*) Den Physiologen interessiert vielleicht die Beobachtung, welche Herr Prof. Wachsmuth und ich machten, daß das scharf ausgesprochene S wohl eine halbe Stunde für uns unhörbar blieb und nur ein f-ähnlicher Laut zur Wahrnehmung gelangte. Hier liegt wohl auch die Ursache, daß das gesprochene S durch die besten bekannten Sprechapparate (Grammophon) nicht genau als solches wiedergegeben werden kann, sondern immer nur dieser f-ähnliche Laut zur Wiedergabe gelangt. Es würde das seinen Grund haben in der wenig genauen Aufnahme einer Wellenform von so kleiner Wellenlänge und Amplitude, wie sie eben der charakteristische Oberton im S fordert.

ausgesprochene Erfahrung, daß das menschliche Ohr zur Wahrnehmung von Tönen verschiedener Höhe ganz verschiedener Energiemengen bedarf. In vorliegendem Fall, wo immer die gleiche Energie erforderlich ist, um die Rotation der Lamelle entstehen zu lassen, klingt der höhere Ton viel intensiver als der tiefere. Es wäre hier vielleicht die Möglichkeit gegeben, die Energie zweier mit gleicher Höhe gehörten Töne durch das Verhältnis der erzeugten Rotationsgeschwindigkeiten zahlenmäßig zu vergleichen. Doch sind langsame Rotationen schwer zu erzwingen, da die Haut wegen des hohen Grades von Zähigkeit auch einen starken Widerstand gegen die Bewegung besitzt. Ist dieser durch die Steigerung der Tonintensität überwunden, so setzt die Rotation fast plötzlich und mit ziemlicher Geschwindigkeit ein, so daß diese nicht mehr genau bestimmt werden kann. Andererseits liegt in der Plötzlichkeit des Einsetzens bei bestimmter Stärke der zugeführten Energie wieder der Vorteil, daß eine, nur von der Dicke der Lamelle abhängende, feste Energiegrenze vorliegt, bis zu welcher die Tonstärken von verschiedener Höhe anwachsen müssen.

Die äußerste Empfindlichkeit der Membran zeigte sich übrigens immer dann, wenn der Resonator nicht genau auf die Wellenlänge des betreffenden Tones abgestimmt war, eine Erfahrung [15]), wie sie in analoger Weise ja auch bereits mit Resonatorkästen von Stimmgabeln gemacht worden ist.

Die Untersuchungen erstreckten sich nun weiter darauf, festzustellen, durch welche Ursachen die beiden

Figuren bezw. ihre Rotation hervorgerufen werden, und ob diese in der Seifenhaut selbst darunter oder darüber liegen; d. h.: Besteht eine Verwandtschaft der Spannungen in der Seifenhaut zu den in Klangplatten auftretenden Kräften oder wird die Rotation durch die entsprechende Bewegung der im Glaszylinder eingeschlossenen, in Resonanz stehenden Luftmasse hervorgerufen, oder schließlich, ist die äußere Wirkung der Schallwellen die Veranlassung der Drehbewegungen? Würden durch die Tonerregung Spannungen in der Membran erzeugt, so müssen diese sich in Rotation ausgleichen, aber die Richtung der Symmetrieaxe dürfte dann nur von der Membran selbst, d. h. von ihrer Form abhängen. Die betreffenden Spannungen wären ferner eng mit dem Auftreten des Wellensystems verbunden, so daß die Rotation sofort bei Bildung des letzteren einsetzen müßte. Dies ist aber nicht der Fall. Es erscheint zunächst das System, und erst bei stärkerer Erregung beginnen die Drehungen. Außerdem müßte die Anwendung verschieden hoher Töne oder verschieden großer Membrane jeweils andere Spannungen und damit andere Figuren zur Folge haben. Wie bereits oben bemerkt, ist aber die Bildung der beiden Figuren vollkommen unabhängig von der Tonhöhe und der Größe der Lamelle, so daß man deren Entstehung wohl auf andere Kräfte zurückführen muß.

Veränderte man die Resonanz der Röhre durch langsames Zuführen von Wasser, so nahm die Geschwindigkeit der Bewegungen sichtlich ab und kam schließlich zum Stillstand. Die Resonanz war also zur

Erzeugung des Vorganges erforderlich. Hiervon ausgehend konnte man die Ursache im Verhalten der Luftmasse des Resonators zu finden hoffen. Um nun dieses Verhalten sichtbar zu machen, wurde der Resonator mit Tabaksqualm gefüllt; indessen zeigte dieser auch bei heftigster Erregung der Stimmgabel keinerlei Neigung, bestimmte Formen anzunehmen. Zur Feststellung, ob etwa innere Schallwellenreflexe das Zustandekommen der Figuren bedingen, versuchte ich diesen durch Änderung des Querschnitts der Resonatoren eine andere Form zu geben, aber weder kugelförmige, noch solche von drei- oder viereckigem Profil waren imstande, den geringsten Einfluß auszuüben. Die Figuren blieben immer dieselben, und der Drehungssinn schien lediglich durch die Fortpflanzungsrichtung der Tonwellen bestimmt. Es ist hiermit erwiesen, daß die Luftmasse des Resonators nicht die unmittelbare Veranlassung zum Auftreten des Phänomens sein konnte, sondern daß diese nur die Empfindlichkeit der Membran für einen bestimmten Ton erhöht und dadurch das Zustandekommen der Erscheinung begünstigt.

Die folgenden Beobachtungen zwingen zu der Annahme, daß die Rotation von außen her veranlaßt wird. Beim Durchschreiten des Zimmers ließen sich durch das Gehör mit einiger Deutlichkeit die Knotenlinien stehender Wellenzüge unterscheiden, und es war mir bereits vorher die mit dem Abstand wechselnde Empfindlichkeit der Membran aufgefallen. Wenn man die Entfernung der tönenden Stimmgabel von der

Membran vergrößert, so vermindert sich deren Rotationsgeschwindigkeit, bis sie in einem bestimmten Abstand Null wird. Dieser Abstand ist von der Stärke des Tones unabhängig, wechselt aber mit der Tonhöhe. Bei weiterer Vergrößerung der Distanz beginnen die Bewegungen von neuem, jetzt aber hat der Drehungssinn gewechselt. Dabei bleibt die Lage der Symmetrieaxe unverändert.

Um ein bestimmtes System stehender Wellen zu erzeugen, wurde die Versuchsanordnung dahin geändert, daß die Tonquelle — dieses Mal eine Orgelpfeife mit 258 Schwingungen — ihren festen Platz erhielt, während mit der Membran (in Verbindung mit dem Resonator) das Zimmer abgeschritten wurde. Da Luftzug und Erschütterungen auf der Seifenhaut unangenehm bemerkbar waren, so zeigte es sich empfehlenswert, den Apparat bei jeder Beobachtung fest zu unterstützen. Zunächst traten nun dieselben Erscheinungen auf wie vorher. Weiter war auch ein sehr auffälliges Verhalten der Symmetrieaxe zu bemerken. Bewegte ich mich nämlich mit der Membran parallel zu einer Wand, oder überhaupt, in Richtung einer Geraden durch das Zimmer, so war es meistens der Fall, daß sich die Axe und mit ihr das ganze Bild der Membran um größere oder kleinere Winkel um ihren Mittelpunkt drehte, und zwar blieb diese Ablenkung an bestimmten Stellen des Zimmers immer die gleiche, d. h. wenn man die Membran wieder zurückbrachte, so nahm ihre Axe an der betreffenden Stelle wieder diejenige Richtung an, welche sie vorher inne hatte. Diese

verschiedenartigen Einstellungen sind offenbar auf Welleninterferenzen zurückzuführen, die im Zimmer auftreten. — Dieselben kamen im weiteren Verlaufe meiner Untersuchungen sehr lästig zur Geltung, zumal dieses System schwer zu übersehen war.

Fig. 8, welche eine Aufnahme des Zimmers und die Einstellung der Membran an den verschiedenen

Maßstab 1 : 40.

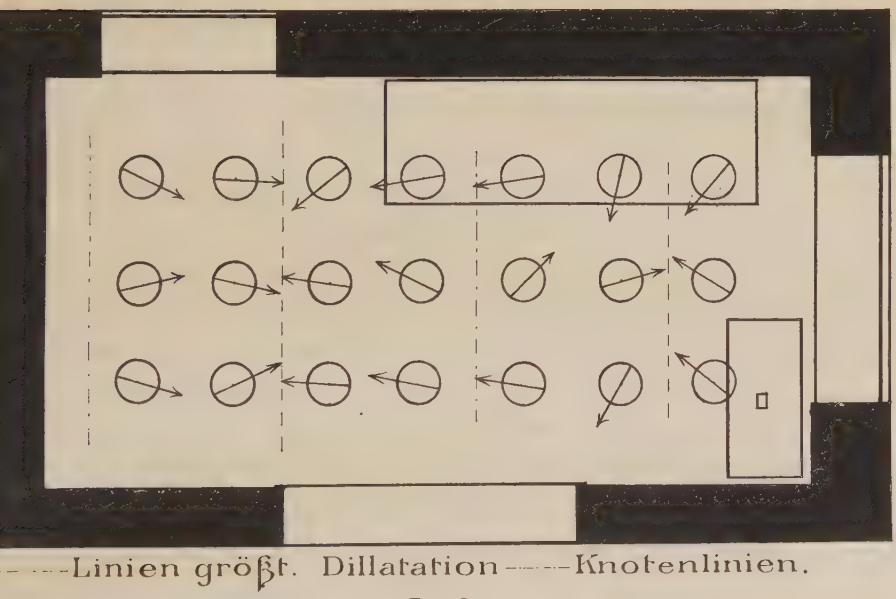


Fig. 8.

Stellen desselben wiedergibt, läßt den komplizierten Verlauf der Knotenlinien erkennen. Man muß bedenken, daß der Schall nicht nur von den Wänden, in denen sich große Tür- und Fenstereinschnitte befanden, reflektiert wurde, sondern auch von dem nicht entfernbaren

Zimmerinventar. Die Empfindlichkeit der Membran auf stehende Wellen war dabei so groß, daß die Annäherung einer Person, infolge Änderung des Interferenzzustandes, immer eine Ablenkung der Symmetrieaxe zur Folge hatte.

Um diese störenden Einflüsse möglichst zu umgehen, rückte ich mit der Membran immer in der Richtung vor, in welche ihre Axe jeweils zeigte, also ähnlich, wie man mit einer Magnetnadel einen magnetischen Pol suchen würde. Näherte ich mich nun auf solche Art einer Knotenlinie, so war die Bewegungsrichtung der Membran immer von diesen weggerichtet. Beim Erreichen der Linien hörte die Bewegung plötzlich auf. Beim Weiterschreiten setzte die Rotation eben so rasch, aber in umgekehrter Richtung wieder ein und fiel gegen die Stellen größerer Dillatation hin langsam ab. Beim Passieren der letzteren begann nach kurzem Stillstand das Spiel in umgekehrter Weise von neuem. Es war allerdings oft recht schwierig, die Knotenlinien mit dem Gehör genau festzustellen. In solchen Fällen wurde der Verlauf der Untersuchung unterbrochen und an geeignetem Platze von neuem aufgenommen. Durch häufige Versuche wurde der Nachweis erbracht, daß die Rotationsbewegungen in der Tat sowohl an den Stellen größter Dillatation als an solchen stärkster Kontraktion aussetzen bezw. wechseln. Dabei ist die Bewegung der Symmetrieaxe von den Knotenlinien, wie bereits erwähnt, abgerichtet.

Was ferner die Zu- und Abnahme der Geschwindigkeit betrifft, so scheint dieselbe in der Nähe der Knoten-

linien eine beschleunigtere zu sein. Eine genaue Bestimmung der Beschleunigung war mir nicht möglich, da die Bewegung gewöhnlich mit mittlerer Geschwindigkeit einsetzte und, wie gesagt, das Interferenzsystem zu störend wirkte.

V.

Um sich nun eine Vorstellung über das Zustandekommen jener eigenartigen Gebilde machen zu können, ist es am zweckmäßigsten, dieselben nach ihren charakteristischen Merkmalen in Vergleich mit bekannten, ähnlichen Erscheinungen zu stellen. — Schellbach berichtete bereits 1870 in Pogg. Annalen (Bd. 139; pag. 670), daß es ihm gelang, eine Flamme durch Vorhalten an das offene Ende eines Stimmgabelresonators bei heftiger Erregung der Gabel zum Erlöschen zu bringen. Ertönte die Stimmgabel weniger stark, so wurde die Flamme in der Richtung der Tonwellen abgestoßen. Diese Phänomene, die in ähnlicher Weise in Flüssigkeiten nachgewiesen wurden, sind namentlich von Dvořák[18]) genauer untersucht worden, und ich möchte deshalb auf dessen Ergebnisse zurückkommen. Dvořák schreibt darüber: „In jeder Luftsäule, die stehende Schwingungen ausführt, zeigt ein Manometer im Schwingungsknoten einen kleinen Druck an. Vom Knoten gegen den Bauch nimmt dieser Druck stetig ab, und er ist im Bauche sehr klein oder beinahe = 0 . . . Dieser Überdruck in den Knoten

einer schwingenden Luftsäule hat darin seinen Grund, daß die Amplitude der Schwingungen nicht gegen die Wellenlänge verschwindet. In diesem Falle fällt die Verdünnung kleiner aus als die Verdichtung, der mittlere Druckzuwachs kann also nicht $= 0$ sein. Dies kann man ohne Schwierigkeit einsehen. Es sollen nämlich x und $x + dx$ die Abszissen zweier Teilchen, ξ und $d\xi$ die zugehörigen Exkursionen vorstellen. Ist dx die Entfernung der Teilchen in der Ruhelage, so ist sie $dx + d\xi$ in der Exkursion. Nimmt man die Dichte des ruhenden Mediums als Einheit, so drückt sich jene des bewegten einfach durch

$$\frac{dx}{dx + d\xi} = \frac{1}{1 + \frac{d\xi}{dx}}$$

aus, was sich auf $1 - \frac{d\xi}{dx}$ reduziert, wenn man die Exkursion als sehr klein betrachtet. Die Dichtenveränderung ohne Rücksicht auf das Zeichen ist also $= \frac{d\xi}{dx}$, wobei die Exkursion ξ als Funktion der Abszisse x und der Zeit t gegeben ist. Wenn nun die Exkursionen nicht als verschwindend klein betrachtet werden können, so ist

$$\frac{1}{1 + \frac{d\xi}{dx}} = 1 - \frac{d\xi}{dx} + \left(\frac{d\xi}{dx}\right)^2.$$

Die Verdichtung ist demnach, wenn man die übrigen Glieder vernachlässigt

$$\frac{d\xi}{dx} + \left(\frac{d\xi}{dx}\right)^2,$$

die Verdünnung jedoch

$$-\frac{d\xi}{dx} + \left(\frac{d\xi}{dx}\right)^2.$$

Der mittlere Druckzuwachs für eine bestimmte Abszisse ist somit

$$\int_0^T \left(\frac{d\xi}{dx}\right)^2 \cdot \frac{dt}{T},$$

wobei T die Schwingungsdauer vorstellt. Die eigentümliche Druckverteilung in einer schwingenden Luftsäule hat eine sehr merkwürdige Bewegung der Luft zur Folge. Da nämlich der mittlere Druck von den Knoten gegen die Bäuche stetig abnimmt, so muß die Luft notwendig von den Knoten gegen die Bäuche strömen.“ Daß dies tatsächlich der Fall ist, wurde durch Versuche wiederholt nachgewiesen.

Man kann sich nun vorstellen, daß die Bewegung auf der Lamelle folgendermaßen zustande kommt. Der Resonator verleiht der Membran nicht nur einen bestimmten stehenden Schwingungszustand, sondern erhöht dadurch auch deren Empfindlichkeit für von außen auf sie wirkende, mechanische Kräfte. Man kann dies daraus ersehen, daß die Beweglichkeit der

Lamelle im Ruhezustand wesentlich geringer ist als während der Erregung. Erhält jetzt die Membran einen Kraftimpuls — wie wir nach Dvořák annehmen können — so entsteht auf derselben eine Bewegung, und zwar wird sie da einsetzen, wo jener einwirkenden Kraft die größte Angriffsfläche geboten wird, d. i. in Richtung des Durchmessers. Es sei übrigens noch bemerkt, daß durch Vorhalten einer kleinen Pappscheibe quer zur Richtung der Schallwellen die Bewegung sofort unterbrochen werden konnte. Ebenso war es möglich, die beschriebenen Figuren durch einen feinen Luftstrom, der über die Membran geleitet wurde, zu erzeugen. Immerhin möchte ich hiermit nur eine Erklärung für das Zustandekommen jenes eigenartigen Phänomens gegeben haben, ohne dessen genauere Erforschung als abgeschlossen betrachten zu wollen.

Ob die Symmetrieaxe der Membran eine genau senkrechte Stellung zu den Knotenlinien einnimmt, ließ sich nicht feststellen. Indessen darf man annehmen, daß die Luft von Stellen höheren Potentials auf dem kürzesten Wege zu denen niederen Potentials abfließen wird, in diesem Falle in senkrechter Richtung nach den Linien geringsten Drucks. Da die Symmetrieaxe in diese Strömungsrichtung fällt, so muß auch sie senkrecht zu den Bauch- bezw. Knotenlinien verlaufen und zwar nur dann, wenn man einen einfachen stehenden Wellenzug voraussetzt. In einem komplizierten System, wie es durch die mehrfache Reflektion im Innern eines Zimmers zustande kommt, kann natürlich die Symmetrieaxe nur mit der Resultante der sich

kreuzenden Wellenlinien zusammenfallen. Diese Annahme wird durch Fig. 8 bekräftigt. Die Bewegung der Membran richtet sich auf der mittleren (der drei Linien) beinahe regelrecht von den Knoten weg, während das übrige System stark gestört erscheint.

VI.

Die Ergebnisse sind, nochmals kurz zusammengefaßt, folgende:

1) Die auf kreisförmigen Flüssigkeitsmembranen sich bildenden Klangfiguren bestehen aus radialen bezw. kreisförmig gelagerten Knotenlinien-Elementen, die sich niemals schneiden.

2) Die von Herrn Sedley Taylor beobachteten Farbenbilder, welche auf kreisförmigen Seifenmembranen auftreten, lassen sich alle auf eine Grundfigur zurückführen. Dieselbe entsteht dadurch, daß sich die Lamelle bei ihrer Erregung in zwei Hälften scheidet, welche symmetrisch gegen einander rotieren.

3) Wenn mehrere Figuren auftreten, so ist dies auf ungleiche Dichtebeschaffenheit der Membran zurückzuführen. In solchen Fällen kann sofort die Grundfigur wieder hervorgerufen werden, wenn man die Lamelle durch starke Erschütterung homogen macht.

4) Die Zahl und Form der Figuren ist entgegengesetzt Taylors Angaben unabhängig von der Tonhöhe, Tonintensität und der Größe der Membran.

5) Die Entstehung und Rotation der Figuren ist auf Luftströmungen innerhalb stehender Wellenzüge zurückzuführen. Die Bewegung der Symmetrieaxe ist dabei von den Knoten weggerichtet.

6) Da das Phänomen immer der gleichen Energiemengen bedarf, um aufzutreten, so wird ein Vergleich der Empfindlichkeit des Ohres für verschieden hohe, aber gleiche Energie enthaltende Töne ermöglicht. Je mehr (zu diesem Zwecke) die Tonhöhe gesteigert wird, um so lauter und unangenehmer ist die Einwirkung auf das Ohr. Sollte der Ton einer Galtonpfeife, welche mit komprimierter Luft betrieben wurde, bei 4000 Schwingungen eine Bewegung der Membran hervorrufen, so mußte er zu solcher Stärke anwachsen, daß er nach einigen Minuten eine zeitliche Störung des betreffenden Gehörnerven zur Folge hatte. Es findet hier das von Herrn Max Wien quantitativ bestimmte Resultat eine Bestätigung, daß hohe Töne, um wahrgenommen zu werden, weit weniger Energie bedürfen, als solche von geringerer Schwingungszahl.

Literatur.

1) Oersted, Ann. de chim. et de phys. T. 25. 1824.
2) Savart, Annales de chim. et de phys. (2) 32; 384. 1826.
3) Poisson, Mémoires de l'Académie 8. 1829.
4) Strehlke, Pogg. Ann. 80; 84. 1830.
5) Chladni, Akustik. 1830.
6) Biot, Mém. de l'Institut Sciences phys. et math. tom IV, pag. 21.
7) Bourget et Bernard, Annales de chim. et de phys. (3) 60; 449. 1860.
8) Bourget, Annales de l'École normale supérieure (1) 3; 55. 1866.
9) Lamé, Leçons sur la théorie de l'élasticité.
10) Melde, Akustik. 1883.
11) Gehlers, Phys. Wörterbuch VIII.
12) Melde, Über Transversalschwing. flüss. Lamellen Pogg. Ann. 159; 275. 1876.
13) Melde, Akust. Experimental-Untersuchungen, Wied. Ann. 30; 169. 1887.
14) Sedley Taylor, On the vibration of a liquid film etc. Proceed. of the Royal society of Ld. 1877.
15) Violle, Lehrb. d. Physik II (Akustik) 284. 1893.
16) Antolik, Über Klangfig. gesp. Memb. etc. Pozsoni 1904.
17) Max Wien, Über d. Empf. d. menschl. Ohres für Töne versch. Höhe. Bonn 1903.
18) Dvořák, Pogg. Ann. 157; 58. 1876.

Zum Schlusse möchte ich Herrn Prof. Wachsmuth meinen verbindlichsten Dank für sein liebenswürdiges Entgegenkommen sowohl wie für seine freundlichst gewährten Ratschläge aussprechen.

Herrn Prof. Matthiessen bin ich für die Überlassung der Apparate zu Dank verpflichtet.